

David MIKOLÁŠEK¹, Oldřich SUCHARDA², Jiří BROŽOVSKÝ³

NUMERICKÁ ANALÝZA PLNÉ VAZBY KROVU

RAFTER NUMERICAL ANALYSIS

Abstrakt

Mezi běžné konstrukční soustavy šikmých střech patří plná vazba vaznicového krovu, které se věnuje tento příspěvek. V současné době se nároky na původní tesařské spoje a konstrukce značně změnily. Příspěvek se zabývá numerickou analýzou zaměřenou na vodorovnou tuhost spojení v místě zakotvení pozednice do železobetonového věnce. Pro analýzu je zvolena metoda konečných prvků, kdy výpočetní model je prostorový. V provedených výpočtech je zahrnuta geometrická nelinearita a jsou použity kontaktní prvky. Cílem příspěvku je vytvořit model skutečného chování konstrukce a analyzovat vybrané detaily.

Klíčová slova

Krov, model, analýza, tuhost, dřevo.

Abstract

The article discusses static analysis of rafter structures. This type of a roof structure is very common but the modern requirements have made necessary a deeper understanding of its static function. A numerical analysis of horizontal stiffness is provided. The finite element method and non-linear analysis is used in order to obtain a more realistic model behaviour.

Keywords

Truss, model, analysis, stiffness, wood.

1 ÚVOD

Dřevěné krovy jsou stále nejpoužívanějšími konstrukcemi u šikmých střech občanských a bytových staveb. Tyto konstrukce jsou prověřeny mnoha staletími [11] a může se zdát, že zde není prostor pro nové poznatky ohledně jejich chování. V současné době se však nároky na původní tesařské spoje a konstrukce značně změnily. Původní typy krovů jsou dnes používány na rozpony pro které původně nebyly navrhovány a stále častěji využívané podkroví klade zvýšené nároky též na omezení deformací krovu.

Současné požadavky na návrh a analýzu dřevěných konstrukcí uvádí [4] a [5]. Ze zahraničních norem se podrobně dřevěným konstrukcím věnují německé normy [2] a autoři [1]. Význam dřevěných konstrukcí také potvrzuje výzkum, který se zabývá modelováním skutečného chování

¹ Ing. David Mikolášek, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: david.mikolasek@vsb.cz.

² Ing. Oldřich Sucharda, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: oldrich.sucharda@vsb.cz.

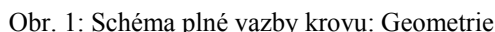
³ Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz .

Důležitou otázkou u chování těchto typů konstrukcí (dřevěné tesařské konstrukce) jsou vodorovné a svislé deformace, které souvisí s kvalitou provedení spojů a s tuhostí v uložení (vnější vazby) [15]. Krovky jsou dnes součástí stavby jako výrazný estetický prvek vnější a vnitřní architektury. Na chování konstrukce krovy závisí další nosné prvky, podhledy, vnější i vnitřní omítky a příčky. Pokud není krov dostatečně tuhý, vznikají nadměrné deformace a dochází k nežádoucím změnám jeho tvaru. U navazujících konstrukcí vzniká riziko tvorby prasklin, případně tyto prvky a konstrukce mohou přestat plnit svoji funkci.

- působení zatížení větrem, standardní vnější zatížení mající vodorovný směr,
- reakce do konstrukce krovu z navazujících konstrukcí,
- nevhodně zvolený konstrukční a statický systém (vazba krovu se chová jako trojkloubový rám).

Z těchto důvodů je věnována u statické analýzy prezentované v příspěvku pozornost především vodorovným tuhostem vybraných částí krovu, kde bylo studováno přerozdělení vnitřních sil závislých na změnách tuhostí v přípojkách. Pro analýzu konstrukce byl zvolen program ANSYS [19], který umožňuje řešení nelineárních úloh [18] a [21] metodou konečných prvků [22].

Na obrázku obr. 1 je znázorněn příčný řez plnou vazbou krovu s vyznačenými detaily a působícím zatížením. Zatížení je znázorněno schématicky. Konstrukční detaily A až D jsou zobrazeny na obr. 2. Podrobně se konstrukčními detaily krovů zabývá [10]. Charakteristiky dřeva použité v programu ANSYS uvádí tab. 1.

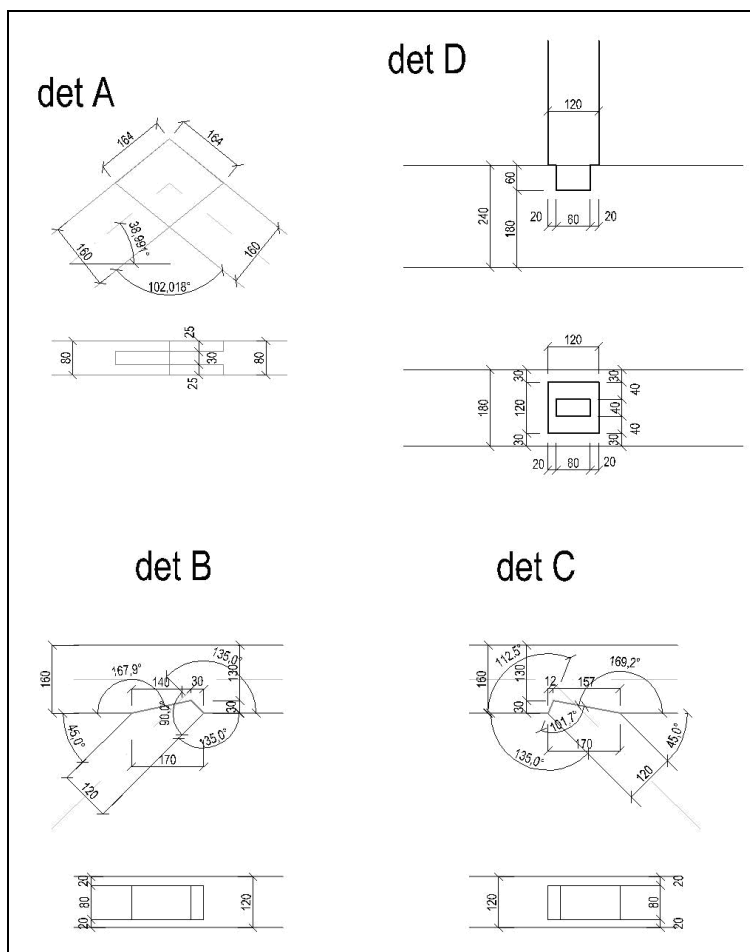


270

zhlaví a uprostřed položen na dubovou desku a je odvětrán v místě uložení). Vazný trám podpirají dva sloupky profilu 120/120 mm. Sloupky podpirají střední vaznice, které jsou v místě plné vazby rozepřeny hambálkem (viz. detail B na obr. 2) o průřezu 120/160 mm. Příčnou tuhost plné vazby zajišťují dva šikmé pásy, které jsou osedlány na sloupku i hambálku běžným tesařským spojem čelního zapuštění (viz. detail B a C na obr. 2). Pásy jsou konstrukčně zajištěny v místech uložení pomocí ocelových vrutů s průběžným závitem Ø 9 mm třídy oceli 8.8. Veškeré dřevo na této konstrukci je řezané, třídy pevnosti C24.

Tab. 1: Ortotropní vlastnosti dřeva

E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	γ_{xy} [-]	γ_{yz} [-]	γ_{xz} [-]	G_x [MPa]	G_y [MPa]	G_z [MPa]
11600	900	500	0,470	0,250	0,370	720	39	750



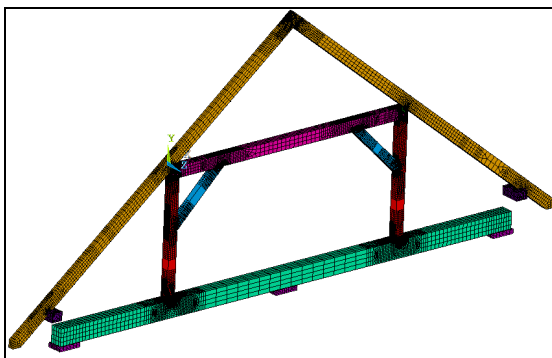
Obr. 2: Konstrukční detaily

Součásti krovu jsou také pozednice profilu 160/120 umístěny na ležato. Na tyto pozednice jsou tesařsky na sedlo uloženy krokve profilu 80/160. Krokve jsou k pozednici ukotveny vrutem s průběžným závitem Ø9 mm třídy oceli 8.8 délky 320 mm. Krokve jsou dále uloženy na středovou vaznici profilu 160/220 a jsou k ní též kotveny vrutem se závitem Ø9 mm (třída oceli 8.8). Středová vaznice je nosný podpůrný prvek pro krokve prázdných vazeb mezi plnými vazbami cca 4 - 5 m.

Ve vrcholu jsou krokve spojeny na tesařský spoj viz detail A. Tento spoj je zajištěn svorníkem Ø20 mm třídy oceli 5.8. Tento svorník není, ale ve výpočtu uvažován, je pouze fixační. Svorník zajišťuje u skutečné konstrukce pouze spojitost posunů, ale umožňuje natočení ve spoji. Při tvorbě zatížení a kombinací byly pro analýzu použity předpoklady [6], [7] a [8].

3 VÝPOČETNÍ MODEL A PARAMETRY VÝPOČTU

Prostorový výpočetní model krovu tvoří 3D objemové konečné prvky SOLID45 a prutové konečné prvky BEAM4 [19]. Prutové prvky jsou použity pro vytvoření přípoje vrutu. Konečný prvek SOLID45 má 8 uzlů a 24 neznámých posunutí. U konečného prvku [22] je možné nastavit anisotropní, ortotropní nebo isotropní materiálové vlastnosti. Při výpočtu je zohledněna geometrická a konstrukční nelinearita, kdy kontaktní prvky jsou použity pro modelování tření ve spojích. Použité kontaktní prvky jsou CONTA174 a TARGE170 [19]. Fyzikální nelinearita materiálu není u plné vazby krovu uvažována, protože pro návrhové zatěžovací stavy je nutné zajistit, aby napjatost dřeva byla nižší než únosnost dřeva. Dalším důvodem bylo také snížení časové náročnosti na výpočet. Řešená soustava rovnic matice tuhosti konstrukce měla celkem 280 077 rovnic. Fyzikálně nelineární výpočet je proveden jen pro vybraný detail pásku zobrazeného na obr. 11. Řešený tvar plné vazby krovu a vytvořený výpočetní model pro konečně-prvkovou analýzu v programu ANSYS zobrazuje obr. 3.



Obr. 3: Plná vazba krovu, výpočetní model v ANSYS

4 VÝPOČETNÍ MODEL A VARIANTY VÝPOČTU

Pro vyhodnocení tuhostních charakteristik krovu jsou provedeny čtyři různé varianty výpočetního modelu. První model je tvořen plnou vazbou zobrazenou na obr. 3.

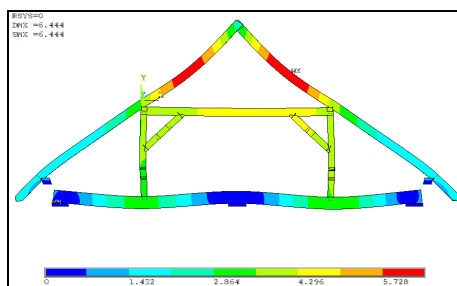
Druhý model krovu je tvořen neposuvnými (polotuhými) vazbami v patách a hambálekem s vlivem poddajnosti svorníku. Na každé straně je jeden svorník oceli 5.8, průměru Ø20 mm s tuhostí proti prokluzu na jeden stříh cca $K_{ser,l} = 10 \text{ MNm}^{-1}$. Tedy na jeden spoj pro dva stříhy máme celkem tuhost $K_{ser,2} = 20 \text{ MNm}^{-1}$. V patách je sepnut krov (krokev k pozednici) pomocí jednoho vrutu s celým závitem vnějšího průměru Ø9 mm, třídou oceli 8.8 o délce cca 320 mm. Síla na vytažení vrutu je cca $F_x = 14,4 \text{ kN}$ podle [4] a [5] a sřížná síla je podle té samé normy cca $F_s = 6,8 \text{ kN}$. Tuhost proti posunutí vrutu je na jeden stříh cca $K_{ser,v} = 3,4 \text{ MNm}^{-1}$. Tuhost proti vytažení tohoto vrutu pro tento typ spoje je cca $K_{ser,h} = 4,49 \text{ MNm}^{-1}$. Hodnoty prokluzů a pevností jsou bez uvážení parciálních součinitelů bezpečnosti, jde o orientační horní hodnoty.

Třetí model vychází z prvního, pouze není uvažováno se spolupůsobením vrutů. Vodorovnou reakci a její přenos zabezpečuje pouze tření mezi krovky a pozednicí pro součinitel tření v klidu (dřevo – dřevo) cca $\zeta = 0,65$.

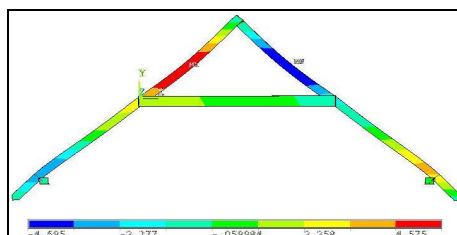
Čtvrtý model opět vychází z prvního, ale není uvažováno se spolupůsobením kleštín. Kleštiny jsou z modelu odstraněny a krov působí jako čistý trojkloubový rám (vznik vodorovných reakcí je nutný).

5 VÝSLEDKY ANALÝZY – TUHOST A DEFORMACE

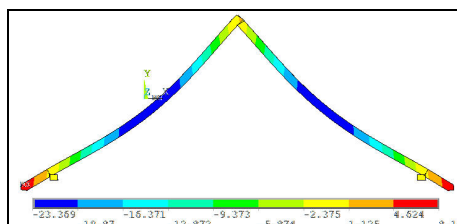
U analýzy krovu byly porovnávány u jednotlivých variant výpočetního modelu deformace v podpoře mezi krokvi a pozednicí. Na obr. 4 je zobrazena deformovaná plná vazba. Podle tuhostí získaných z tohoto modelu plné vazby v programu ANSYS je tuhost v uložení cca $K_{ul} = 8 - 10 \text{ MNm}^{-1}$.



Obr. 4: Deformace plné vazby konstrukce krovu ANSYS [mm]: první model



Obr. 5: Deformace krokvi s kleštinou ANSYS [mm]: druhý model



Obr. 6: Deformace krokvi (trojkloubový rám) ANSYS [mm]: čtvrtý model

Na obrázku 5 je zobrazena deformovaná vazba krovu tvořená krokvemi, pozednicemi a hambálem. Tato vazba krovu je jedenkrát staticky neurčitá. U hambálových krovů vznikají značné vodorovné síly v podporách. Konstrukce tohoto typu dovoluje vznik velkých vodorovných sil. Přípoj kleštiny je (kloubový) měkký a tato poddajnost má za důsledek deformaci v podporách na pozednicích. Pokud je přípoj u pozednice měkký, tak dojde k velkému prokluzu krokve po pozednici nebo prokluzu a natočení pozednice. To má za následek velké deformace v uložení. Za předpokladu, že pozednice je dostatečně tuhá, tak aby její deformace v uložení byla zanedbatelná, vznikají vodorovné síly cca 5 – 14 kN podle typu krovu a velikosti zatížení. Průběhy deformací pro druhý a třetí model jsou podobné.

Obr. 6 zobrazuje deformovanou vazbu krovu, který je tvořen pouze krokvemi a pozednicemi. Tato konstrukce se chová jako trojkloubový rám. Je to nevhodně volený konstrukční systém pro větší rozpětí krovů, vyvolává velké vodorovné síly ve vnějších vazbách.

Častým problémem u standardních krovů je přenesení velkých vodorovných sil mezi pozednicí a krokví. Je složité a drahé zde rozmístit spojovací prostředky. Mimo to, spojovací prostředky mechanického charakteru (hřebíky, vruty a svorníky) mají vyšší míru duktility, což je

obvyklé u spojů kladná vlastnost. Vykazují, ale také značné deformace vlivem otláčování dřeva nebo ohybu dřívku spojovacích prostředků, takže dovolí určité dotvarování ve spoji a tím vznikají vyšší hodnoty deformací. Pokud se podaří vhodně kotvit jednotlivé prvky mezi sebou, tak problémem je pouze celková síla působící na pozednici a tím na půdní nadezdívku a další navazující konstrukce. Při velikosti teoretické síly na jednu vodorovnou vazbu od krokve cca 10 kN (pokud krokve jsou rozmístěny osově po metru) je vnější zatížení na pozední věnec 10 kNm^{-1} . Na tuto sílu lze věnec navrhnout pro I. mezní stav, ale deformace věnce na délku běžného rodinného domu (cca 10 m) budou značné. Věnec by se proto musel po délce kvůli vodorovné deformaci kotvit do stropu nebo stěn.

Výpočet tuhosti proti posunutí (pozednice + železobetonový věnec spojených závitovou tyčí Ø16 mm, ocel S355, řezivo C24). Vztah (1) podle DIN 1052 udává tuhost v prokluzu spoje:

$$K_{ser} = \rho_k^{1,5} * \frac{d}{20} \quad (1)$$

kde:

K_{ser} – je tuhost proti posunutí na jeden střih $[\text{Nm}^{-1}]$,

d – průměr spojovacího prostředku $[\text{m}]$ a

ρ_k – objemová hustota dřeva $[\text{kgm}^{-3}]$.

Normová tuhost proti posunutí krátkodobého charakteru

$$K_{ser} = 3501,5 * 16 / 20 = 5,238 \text{ MNm}^{-1}. \quad (2)$$

Tuhost bez uvážení délky trvání zatížení a počátečních prokluzů a bez cyklického namáhání jsou cca 2 až 3 vyšší než normou dané. Tedy do výpočtu se vezme

$$K_{norm} = 5,238 * (2+3) / 2 = 13,095 \text{ MNm}^{-1}. \quad (3)$$

Musí se použít tato hodnota prokluzu a nikoli normou daná hodnota, protože se v předešlých výpočtech vycházelo z numerických modelů bez uvážení normových prokluzů. Výsledná tuhost je pak dána vztahem

$$K_{\Sigma} = \frac{K_{ANSYS} * K_{norm}}{K_{ANSYS} + K_{norm}} \quad (4)$$

kde:

K_{Σ} – je tuhost proti posunutí na spoj $[\text{Nm}^{-1}]$,

K_{ANSYS} – je tuhost proti posunutí ANSYS $[\text{Nm}^{-1}]$ a

K_{norm} – je tuhost proti posunutí norma $[\text{Nm}^{-1}]$.

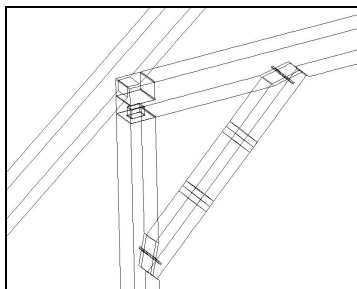
Tento vztah zahrnuje tuhost získanou z ANSYSu a tuhost získanou ze spoje mezi pozednicí a železobetonovým věncem.

Tab. 2: Tuhosti ve spoji pozednice + železobetonový věnec (zjednodušený výpočet)

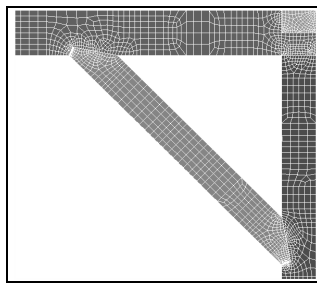
$[\text{MNm}^{-1}]$	ANSYS mod. 1	ANSYS mod. 2	ANSYS mod. 3	ANSYS mod. 4
Tuhost K_{ANSYS}	8,0	6,77	12,92	27,48
Tuhost K_{Σ}	4,97	4,46	6,50	8,87

Tab. 2 ukazuje zjednodušený přehled tuhostí proti posunutí. V prvním řádku je tuhost zjištěná na modelu v ANSYS, v druhém řádku je upravená tuhost z ANSYS podle vztahu (4). Pro staticky neurčené konstrukce nelze sčítat tuhosti. Ale pro tyto spočtené hodnoty tuhostí v druhém řádku tab. 2, korespondují síly a deformace s očekávanými hodnotami sil a deformací na tomto typu konstrukce krovu.

Obrázky 7 a 8 znázorňují geometrii a síť konečných prvků rámového rohu ztužující vazby uvnitř plné vazby krovu. Levý obrázek je průhled na přípoje, tak jak je sestaven s použitím kontaktních prvků v ANSYS. Jsou zde vidět vruty mezi šikmým páskem a sloupem a vodorovným příčným trámem. Pravý obrázek je vykreslení sítě na rámovém rohu. Zde je použito zjemnění sítě v okolí kontaktních ploch. Jemnost sítě je důležitá s ohledem na výstižnost kontaktního napětí v ploše mezi páskem, sloupem a vodorovným prvkem. Tato ztužující vazba v ANSYS nebyla vytvořena prvotně pro získání napětí na objemových prvcích, ale pro získání a porovnání deformace na objemovém modelu ANSYS. Při této jemnosti dělení a velikosti zatížení jdoucí do pásku je možné považovat i napětí na jednotlivých prvcích za dostatečně výstižné.

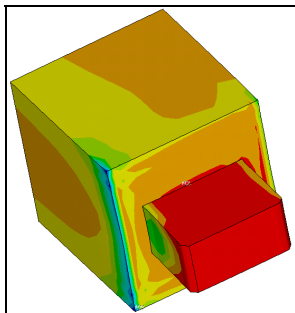


Obr. 7: Průhled na rámový spoj ANSYS

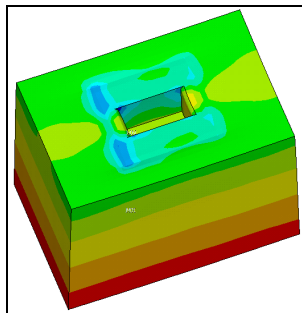


Obr. 8: Rámový spoj - síť ANSYS

Vazba sloupku a hambálku s páskem byla z celkového modelu vyčleněna zvlášť. Z modelu plné vazby byla vybrána výztužná vazba a byla zatěžována vodorovnou silou 5 kN v levém horním rohu a byla zatížena v obou horních rozích svislou silou každá o hodnotě 21 kN. Tato výztužná vazba byla spočtena jako prutová v programu NEXIS (Scia Engineer) [20] a jako objemový model v programu ANSYS [19]. Hodnoty konečných deformací byly přibližně stejné cca 52 mm. Vodorovná tuhost výztužné vazby byla spočtena na hodnotu cca $K = F/\Delta = 5/17,7 = 0,282 \text{ MNm}^{-1}$.



Obr. 9: Napětí σ_x (-9,01; 0,52 MPa)

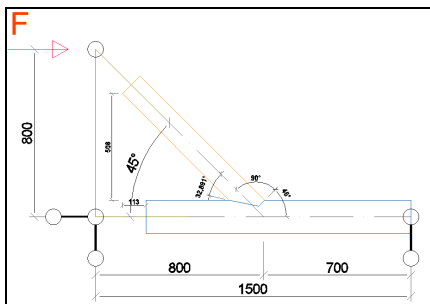


Obr. 10: Napětí σ_x (-15,81; 5,11 MPa)

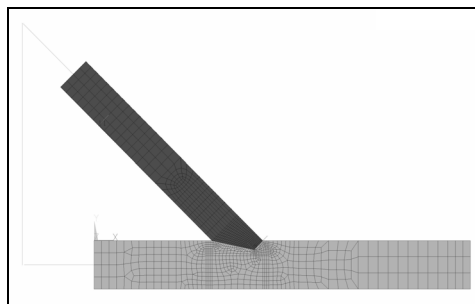
Na obrázku obr. 9 a obr. 10 je zobrazen čepový spoj sloupu a vazného trámu viz obr. 1. Čep je proveden kratší, než je hloubka otvoru vydlabaného ve vazném trámu, aby sloup dosedal na vazný trám ve správném místě. Jsou zde zobrazena napětí ve směru vláken. Pro sloup je toto napětí způsobené především tlakovou silou o hodnotě 21 kN. Napětí ve směru vláken na vazném trámu způsobuje kombinace namáhání od ohybu a tlaku kolmo na vlákna od tlakové síly ve sloupě. Výsledné napětí na obou obrázcích jsou z konečné prvkového modelu plné vazby krovu od symetrického zatížení. Obrázky slouží pro dokreslení představy o průběhu napětí na tomto detailu. Je zde vidět, že sloupek otláčuje konstrukci vazného trámu nerovnoměrně. Je to způsobenou natočením sloupku, který je podepřen vazným trámem.

Na posledních obrázcích je znázorněn vyjmutý detail rámového rohu plné vazby krovu. Tento detail B na obr. 12 byl modelován pro výstižnější popis napětí v oblasti tesařského spoje mezi páskem a vodorovným prvkem. Statický systém byl sestaven tak, aby se pásek mohl volně otáčet na kontaktní ploše, tak jak je mu to umožněno ve skutečné konstrukci. Zatížení bylo na konstrukci

simulováno jako vodorovné silové viz obr. 11 od 0 kN do 40 kN. Podle normy [4] je maximální hodnota síly v tlaku šikmého pásku pro běžné použití cca 16 kN. Pro reálné pevnosti dřeva a bez dílčích součinitelů vlastnosti materiálu je tato hodnota cca 36 kN. Rozhodující pro návrh pásku je zde otláčení vodorovného prvku.

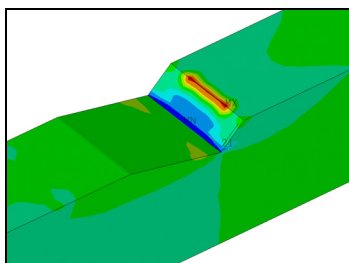


Obr. 11: Schéma spoje

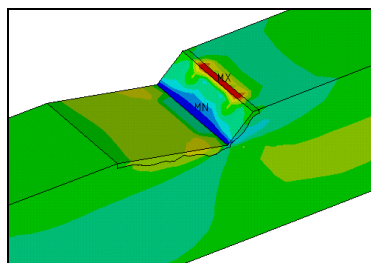


Obr. 12: Schéma spoje ANSYS

Na obr. 13 je vykresleno napětí ve smyku od vodorovné složky síly v pásku. Na tomto obrázku je výsledek spočítaný s nelineárním pracovním diagramem dřeva. V pásku je tlaková síla 16 kN. Na obrázku 14 je zobrazeno také napětí ve smyku, ale pro uvažovaný nehomogenní materiál. Jsou zde modelovány dvě různé vrstvy dřeva s různými pracovními diagramy. Bylo to z důvodu stabilnější konvergence výpočtu. V tomto modelu bylo cílem zjistit maximální sílu, kterou tento spoj přenese. Tato síla byla zjištěna v programu ANSYS hodnotou 35,86 kN (pak nastane zřejmě porušení ve smyku čelní plochy).

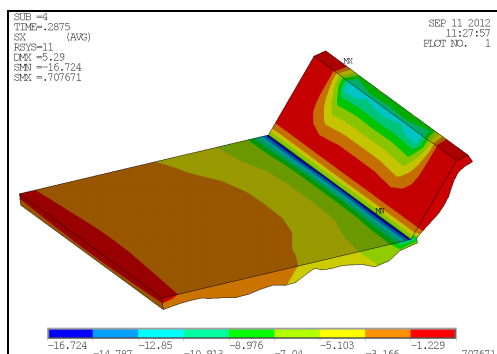


Obr. 13: σ_{xy} (-4,1; +5,1 MPa)



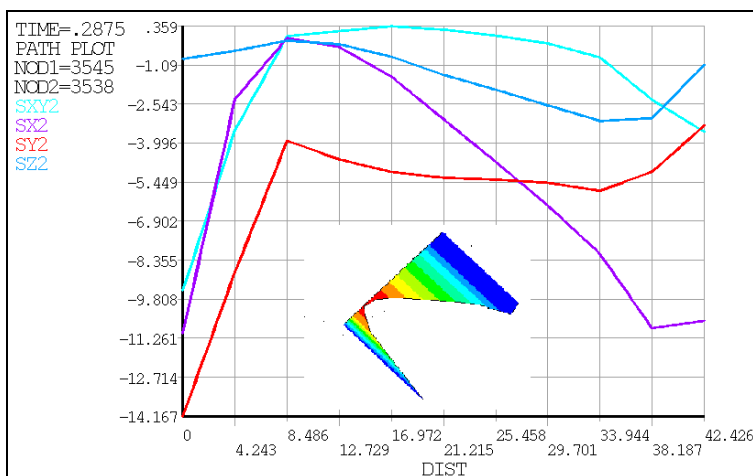
Obr. 14: σ_{xy} (-5,6; +6,0 MPa)

Obrázek 15 je vykreslení napětí kolmo na otláchnou čelní plochu od tlakové síly v pásku. Na tomto obrázku je vykresleno napětí pro nelineární pracovní diagram dřeva. Síla v pásku je 16 kN v tlaku. Můžeme zde vidět přerozdělení napětí na otláčované ploše (šikmá plocha vpravo).



Obr. 15: Výpočet nelineární a homogenní - σ_x (-16,7; +0,7 MPa)

Obrázek 16 ukazuje 4 složky napětí na otláčnou čelní plochu od tlakové síly v pásku. Graf odpovídá modelu z předešlého obr. 15. Je zde vidět napětí kolmo na čelní plochu SX2 (fialová barva), které je zobrazeno také na malém vnitřním obrázku v tomto grafu. Zde se projevuje natočení čela pásku a tímto vzniká nerovnoměrné kontaktní napětí, které má ale téměř lineární průběh. Spodní část křivky SX2 mezi body 0 až cca 8,486 mm je ovlivněna napětím v tlaku a také napětím od ohybu v zářezu.



Obr. 16: Napětí na tesařském spoji - podélný řez čelem

6 ZÁVĚR

Krovy jsou velmi citlivé na tuhost ve vodorovných podporách. U reálné konstrukce, pokud by vodorovná tuhost v podpoře byla dost velká (cca nad 5 MNm^{-1}) a krokve by byly ve vrcholu dokonale kloubově spojeny, bez významných prokluzů, tak se konstrukce bude chovat jako trojkloubový nosník s významným nárůstem vodorovných sil.

Pro určení hodnot tuhostí byl sestaven kompletní objemový model plné vazby za účelem získání tuhosti v podporách. Bylo zjištěno, že pro statický součinitel tření dřevo - dřevo, daný hodnotou $\zeta = 0,65$, bude tuhost proti posunutí cca $K_{ser} = 8 \text{ MNm}^{-1}$ (bez uvážení prokluzu závitové tyče). S uvážením prokluzu závitové tyče mezi železobetonovým věncem a pozednicí bude tuhost proti posunutí v podpoře na hodnotě cca $K_{ser} = 5 \text{ MNm}^{-1}$.

Skutečný krov má v reálném provedení velké množství imperfekcí ve spojích a v uložení. Vlivem nedostatečně tuhé spodní konstrukce (podezdívka a železobetonový věnec) je celková tuhost vazby v uložení (systém věnce, pozednice a krokev) nižší, než je obvykle uvažováno ve výpočtech.

Pokud by, ale podklad byl dostatečně tuhý, tak se tuhost proti posunutí může ve vodorovném směru pohybovat na hodnotě cca $K_{ser} = 4 - 10 \text{ MNm}^{-1}$, podle typu krovy a okrajových podmínek.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory projektu Studentské grantové soutěže VŠB-TU Ostrava. Registrační číslo projektu je SP2012/99.

LITERATURA

- [1] BECKER, K., RAUTENSTRAUCH, K. *Ingenieurholzbau nach Eurocode 5, Konstruktion, Berechnung, Ausführung*. Ernst & Sohn, 400 s., 2012, ISBN 978-3-433-03013-4.
- [2] BECKER, K., BLAß, H., J. *Ingenieurholzbau nach DIN 1052: Einführung mit Beispielen*. Ernst & Sohn, 486 s., 2006, ISBN 978-3-433-02855-1.

- [3] CECCOTTI, A. *Timber–concrete composite structures*. H. Blass (Ed.), *Timber engineering-step 2*, Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- [4] ČSN 73 1702 mod DIN 1052:2004 Navrhování, výpočet a posouzení dřevěných stavebních konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI. 2007. 174 s.
- [5] ČSN EN 1995-1-1 73 1701 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI. 2006. 114 s.
- [6] ČSN EN 1991-1-1 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha: ČNI. 2004. 44s.
- [7] ČSN EN 1991-1-3 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. Praha: ČNI. 2005. 52 s.
- [8] ČSN EN 1991-1-4 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Praha: ČNI. 2007. 124 s.
- [9] DIAS, ALFREDO, M., P., G. JORGE, LUIS, F., C. The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams. *Engineering Structures*, Vol. 33, Iss. 11, Special Issue: SI, pp. 3033-3042 DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.014, 2011.
- [10] GERNER, M. *Tesařské spoje*. Praha: Grada Publishing a.s., 2003.220s. ISBN 80-247-0076-X.
- [11] GÖRLACHER, R. *Historische Holztragwerke; Untersuchungen, Berechnen und Instandsetzen. Sonderforschungsbereich 315*, Universität Karlsruhe (TH), ISBN 3-345540-01-5.
- [12] GUAN, Z.W., ZHU, E.,C. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings, *Engineering Structure*, 31, 2009, 394-403.
- [13] JOHANSEN, K., W. *Theory of Timber Connections. International Association of Bridge and Structural Engineering*, Publication 9, p. 249-262, 1949.
- [14] JOHNNSSON, H. *Plug Shear Failure in Nailed Timber Connections - Avoiding Brittle and Promoting Ductile Failures*. Doctoral thesis, Div. of Timber Structures, Luleå University of Technology, 2004:03.
- [15] KOŽELOUH, B. *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, Obecná pravidla pro pozemní stavby, Komentář k ČSN 73 1702:2007*, Praha: ČKAIT, 228 s, 2008, ISBN 978-80-87093-73-3.
- [16] KUKLÍK, P., KUKLÍKOVÁ, A. *Methods for evaluation of structural timber*. Dřevařský Výskum/Wood Research, Vol. 46, 2001, Iss. 1, pp. 1-10, ISSN 0012-6136.
- [17] LOKAJ, A. *Timber Beam Reliability Assessment*. In *Konference Euro-SIBRAM 2002 Colloquium*. Praha : ITAM CAS, 2002, s. 1-8.
- [18] RAVINGER, J., PSOTNÝ, M. *Analýza konštrukcií. Nelineárne úlohy*. Bratislava: STU v Bratislavě, 2007. 174 s. ISBN 978-80-227-2713-6.
- [19] RELEASE 11 DOCUMENTATION FOR ANSYS, SAS IP, INC., 2007.
- [20] Scia Engineer [online]. 2012 [cit. 2012-01-01]. Dostupný z WWW: < <http://www.scia-online.com>>.
- [21] SUCHARDA, O., BROŽOVSKÝ, J. Pružnoplastické modelování železobetonového nosníku: implementace a srovnání s experimentem. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební*. 2011, roč. 11, č. 1, s. 237-244. ISSN 1213-1962.
- [22] ZIENKIEWICZ, O. C. *The Finite Element Methode in Engineering Science*. London: McGraw-Hill, 1971.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Martin Psotný, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Ing. Mikeš Karel, Ph.D., Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.